

УДК 536.42

## ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ЗАСЫПКИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЁ СУШКИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА

Нига́й Наталья Андреевна<sup>1</sup>,  
nigay\_n.a@mail.ru

Сыро́дой Семен Владимирович<sup>1</sup>,  
ssyrodooy@yandex.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность.** Анализ прогнозов специалистов показывает, что, несмотря на активные попытки многих государств внедрить возобновляемые источники энергии в национальные энергосистемы к 2040 г., основная доля производства тепловой и электрической энергии все равно будет приходиться на тепловые электрические станции, сжигающие уголь. По этой причине на настоящее время ведутся активные разработки новых технологий сжигания топлива, которые позволят полностью (или хотя бы значительно) сократить использование угля на тепловых электрических станциях (ТЭС). Одним из самых перспективных направлений является сжигание древесной биомассы в топочных устройствах котельных агрегатов. Но полномасштабное внедрение биомассы в качестве топлива на ТЭС тормозится неизученностью процессов тепло- и массопереноса, протекающих при сушке влажной древесины. Это обусловлено тем, что, как правило, свежесрубленная древесина значительно насыщена влагой. Сжигание такой высокообводненной биомассы в топочных устройствах неэффективно. При большой исходной влажности много теплоты будет затрачиваться на испарение и, соответственно, коэффициент полезного действия цикла парогенерации может снижаться. Поэтому исходное влагонасыщенное сырье необходимо предварительно подсушивать. В связи с этим одной из открытых проблем энергетики в настоящее время является неизученность основных закономерностей процессов тепло- и массопереноса, протекающих в слое мелкодиспергированной влажной древесной биомассы в период её сушки. Последнее необходимо для разработки фундаментальных основ проведения опытно-конструкторских работ по обоснованию конструктивных характеристик современных установок термической подготовки биомассы к сжиганию. При этом, как правило, сушку больших объемов древесины проводят в крупногабаритном оборудовании бункерного типа. В таких бункерах высота слоя биомассы может достигать нескольких десятков метров (до 20 м). Очевидно, что в этих условиях градиенты плотности древесины (за счет слеживаемости) также будут значительны. При этом достоверно установлено, что на характеристики влагоудаления из слоя влажной древесной биомассы оказывает влияние не только температура внешней среды, но и фильтрационные характеристики (плотность, размер пор, проницаемость, пористость) высушиваемого материала. Но до настоящего времени в мировой научной периодике нет публикаций с описанием результатов оценки влияния плотности засыпки влажной мелкодиспергированной древесины на характеристики и условия её дегидратации.

**Цель:** анализ влияния плотности засыпки слоя влажной древесной биомассы на процессы тепломассопереноса в условиях высокотемпературного нагрева.

**Объект:** влажная древесная биомасса (сосновые опилки). Экспериментальные исследования проведены при следующих значениях степени уплотнения биомассы  $\gamma=1$ ;  $\gamma=1,5$ ;  $\gamma=2$  (где  $\gamma=\rho/\rho_0$ ;  $\rho$  – плотность спрессованной биомассы;  $\rho_0$  – плотность биомассы без уплотнения).

**Метод:** экспериментальные исследования скорости влагоудаления и времени дегидратации влажной древесной биомассы при высокотемпературном нагреве ( $T_g=333\text{--}393\text{ K}$ ) в сушильной камере СНОЛ-3.5-М2У42.

**Результаты.** Приведены результаты экспериментальных исследований процессов влагоудаления из слоя влажной древесной биомассы (на основе типичных отходов деревообработки – опилки) при интенсивном радиационно-конвективном нагреве. Проанализировано влияние насыпной плотности ( $\rho$ ) слоя древесины на характеристики процесса влагоудаления. Установлено, что увеличение степени уплотнения ( $\gamma$ ) навески биомассы приводит к существенному изменению динамики влагоудаления (увеличение  $\gamma$  с 1 до 2 приводит к двукратному росту времени сушки  $t_d$ ). При этом показано, что такое увеличение  $t_d$  характерно для всех исследованных температур окружающей среды  $T_g$ . Также по результатам экспериментов установлены характерные значения массовой скорости влагоудаления ( $W_{eva}$ ) в зависимости от времени при различных степенях уплотнения слоя биомассы. Показано, что в условиях относительно низких температур внешней среды функция  $W_{eva}(t)$  имеет волновой характер. Сформулирована гипотеза, описывающая такую зависимость значений  $W_{eva}$  от времени. Результаты проведенных исследований существенно расширяют современные представления о процессах сушки мелкодиспергированной древесной биомассы в условиях интенсивного радиационно-конвективного нагрева.

### Ключевые слова:

Древесная биомасса, отходы деревообработки, плотность засыпки, сушка, тепломассоперенос, скорость влагоудаления.

### Введение

Древесная биомасса, как показывают современные эконометрические прогностические модели [1–4] развития альтернативной (нетрадиционной) энергетики, является наиболее перспективным и относительно дешевым возобновляемым энергоносителем, доступным практически во всех регионах планеты. Древесина

представляет собой так называемое углерод-нейтральное топливо [5, 6]. Последнее обусловлено тем, что при сжигании древесной биомассы образуется  $\text{CO}_2$ , который не нарушает общего баланса диоксида углерода в атмосфере [7, 8]. Также стоит сказать, что по результатам экспериментальных исследований [9] установлено, что при горении древесной биомассы

практически не образуется антропогенных оксидов азота ( $\text{NO}_x$  [10]) и серы ( $\text{SO}_x$  [11]). По этой причине в развитых (технологически и экономически) странах тепловые электрические станции переводят с угольного топлива на древесную биомассу или на совместное сжигание биомассы с углем [12]. Например, с 2016 г. тепловая электрическая станция Avedore работает на отходах лесопиления и сельского хозяйства [13].

Однако стоит отметить, что даже у одной из самых теплолюбивых пород древесины – дуба, теплота сгорания ( $(Q_n^d)_{wood} = 11 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1}$  [14]) ниже теплолотворной способности самого низкосортного угля (бурого) ( $(Q_n^d)_{lign} = 13 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1}$  [15]). Соответственно, энергоэффективность котельного агрегата, сжигающего древесину, ниже, чем у котла, работающего на угле [16]. Эффективность использования биомассы в энергетике можно повысить за счет разработки новых технологий подготовки и сжигания древесной биомассы в топочных устройствах котельных агрегатов [17] или её пирогазетической [18] переработки в другие продукты.

Одним из важнейших этапов подготовки биомассы перед её использованием (как прямое сжигание [19] в топках паровых и водогрейных котлов, так и термическая переработка [20]) является дегидратация (сушка). Цель последнего – доведение содержания влаги в биомассе до оптимальных (для применяемой технологии) значений (зависит от целей дальнейшего использования биомассы). Несмотря на значимость этого технологического этапа использования биомассы в энергетике, пока нет общей теории, описывающей процессы удаления влаги из насыпных слоёв биомассы. Ранее не было изучено влияние плотности засыпки ( $\rho$ ) на процессы тепло- и массопереноса в слое влажной древесины. Поэтому на настоящее время пока не разработано физической модели, адекватно описывающей процесс влагоудаления из слоя биомассы с большим градиентом  $\rho$ . Цель исследования – анализ влияния плотности засыпки слоя влажной древесной биомассы на процессы тепломассопереноса в условиях высокотемпературного нагрева.

#### Методика проведения экспериментов

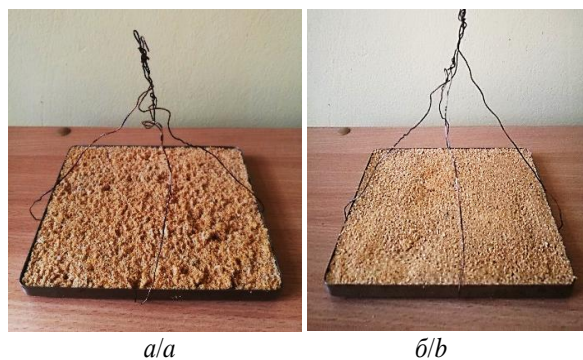
В качестве объекта экспериментальных исследований рассматривались типичные отходы деревообработки (древесные опилки). На рис. 1 представлена навеска (металлический поддон, заполненный биомассой) влажной древесной биомассы с разной степенью уплотнения  $\gamma = \rho/\rho_0 = 1$  (рис. 1, а) и  $\gamma = 1,5$  (рис. 1, б), где  $\rho$  – плотность спрессованного материала;  $\rho_0$  – плотность биомассы (без уплотнения).

Подготовка материала проводилась аналогично [21]. Типичные отходы деревообработки получены путем обработки монолитного (предварительно высушенного) фрагмента древесины сосны электрическим шерхебельным станком. Типичный характерный размер опилок составлял 1–1,5 мм. Сухие опилки предварительно опрыскивались водой из пульверизатора для достижения типичной (по условиям хранения [22]) влажности  $\varphi_0 = 55 \pm 5 \%$  (значения рассчиты-

вались по формуле (1)). Значения  $\varphi_0$  древесной биомассы определялись по формуле:

$$\varphi_0 = \left( \frac{m_1 - m_2}{m_1} \right) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $m_1, m_2$  – масса влажной и сухой биомассы, кг. В случае если влажность навески древесной биомассы превышала контрольное (по условиям эксперимента) значение, навеска вновь высушивалась, и вся процедура влагонасыщения биомассы проводилась заново.



**Рис. 1.** Навеска влажной древесной биомассы (опилки) при плотности засыпки а)  $\gamma = 1$ , без уплотнения; б) с уплотнением  $\gamma = 1,5$

**Fig. 1.** Weighing amount of wet woody biomass (sawdust) with a backfill density; а)  $\gamma = 1$  without compaction; б) with compaction  $\gamma = 1,5$

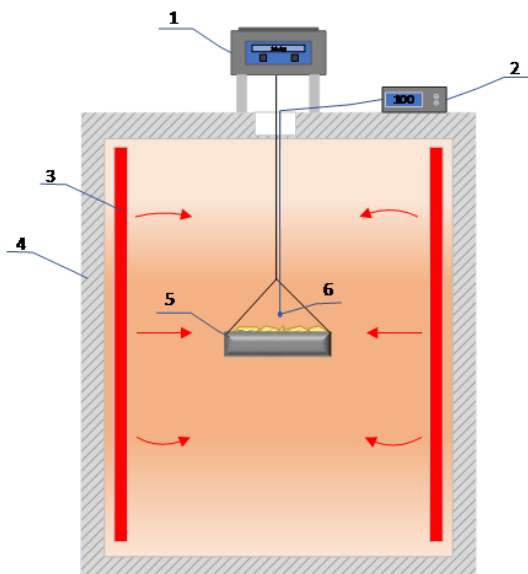
После достижения планируемой влажности древесная биомасса укладывалась в плоский металлический поддон (рис. 1) размерами  $145 \times 125$  мм (площадь  $F_{eva} = 0,0181 \text{ м}^2$ ) для проведения процедуры дегидратации в сушильной камере.

При проведении экспериментальных исследований анализировалось влияние насыпной плотности на характеристики и условия процесса сушки. При проведении экспериментов значения  $\gamma$  варьировались в достаточно широком, но в то же время применимом в реальной практике диапазоне  $\gamma = 1-2$ . Дальнейшее увеличение значений  $\gamma$  нецелесообразно в связи с увеличением затрат на прессовку мелкодиспергированной биомассы. Также при этом растет металлоемкость конструкции бункеров топлива и опорных колонн главного здания ТЭС.

Эксперименты проведены на установке, представленной на рис. 2. Последняя состоит из сушильной камеры СНОЛ-3.5-М2У42 (максимальная температура нагрева  $T_{max} = 423 \text{ К}$ ; скорость нагрева  $10 \text{ К/с}$ ), регистратора температуры внутрикамерного пространства (хромель-алюмелевой термопары (ТХА), погрешность измерения  $T_g$   $0,1 \text{ С}$ ) и высокоточных лабораторных весов АСЗЕТ (CITIZEN) СУ-1003 (погрешность измерения массы  $0,001 \text{ г}$ ).

Навеска древесной биомассы через подвесное соединение крепилась к электронным лабораторным весам (рис. 2). Поддон с опилками размещался в центральной части сушильной камеры. С целью измерения температуры непосредственно вблизи от поверхности исследуемого биоматериала устанавливалась хромель-

алюмелевая термопара (толщина проволоки 0,1 мм; диаметр спая 0,25 мм; время задержки измерений  $\tau_{del}=0,3$  с; погрешность измерения температуры  $\pm 1,5$  К).



**Рис. 2.** Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – высокоточные лабораторные весы ACZET (CITIZEN) CY-1003; 2 – терморегулятор TPM 500; 3 – электрический нагреватель; 4 – сушильная камера SNOL-3.5-M2U42; 5 – поддон с навеской древесной биомассы; 6 – термоэлектрический преобразователь

**Fig. 2.** Schematic diagram of the experimental setup: 1 – high-precision laboratory scales ACZET (CITIZEN) CY-1003; 2 – thermostat TPM 500; 3 – electric heater; 4 – drying chamber SNOL-3.5-M2U42; 5 – pallet with a weight of woody biomass; 6 – thermoelectric converter

Эксперименты проводились по следующей схеме: на первом этапе осуществлялся нагрев внутрикамерного воздуха до заданной (по условиям эксперимента) температуры. Момент наступления постоянной (по времени) температуры воздуха в камере определялся из условия  $d\bar{T}/dt=0$  (где  $\bar{T} = \frac{1}{V} \int T dV$  – средняя по объему температура, К;  $V$  – объем сушильной камеры, м<sup>3</sup>). Затем навеска древесной биомассы помещалась в полость внутрикамерного пространства сушильной установки (рис. 2). Температура воздуха в камере варьировалась в диапазоне от 333 до 393 К. Регистрация массы навески биомассы  $m_{bio}$  проводилась непрерывно в течение всего эксперимента. Каждый опыт продолжался до тех пор, пока значения  $m_{bio}$  не переставали изменяться. Период времени от начала теплового воздействия до момента наступления режима, при котором выполнялось условие  $dm/dt=d\varphi/dt=0$ , считался временем дегидратации ( $t_d$ ).

Каждый эксперимент выполнялся в идентичных условиях не менее пяти раз. С целью определения доверительных интервалов результаты каждой серии эксперимента статистически обрабатывались в соответствии с методикой [23]. На первом этапе определя-

лись математические ожидания значений влажности  $M[\varphi]$ . Затем рассчитывалась дисперсия  $D[\varphi]$  (с учетом оценки смещения) и среднеквадратичное отклонение  $\sigma[\varphi]$ . После отбраковки промахов по критерию Романовского [24] определялись доверительные интервалы  $\Delta\varphi$ . Относительная погрешность измерения  $\delta(\varphi)$  при доверительной вероятности 0,95 составила 8 %. Массовая скорость влагоудаления вычислялась по формуле:

$$W_{eva} = \frac{m_1}{F_{eva}} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{F_{eva}} \frac{dm}{dt}. \quad (2)$$

### Результаты

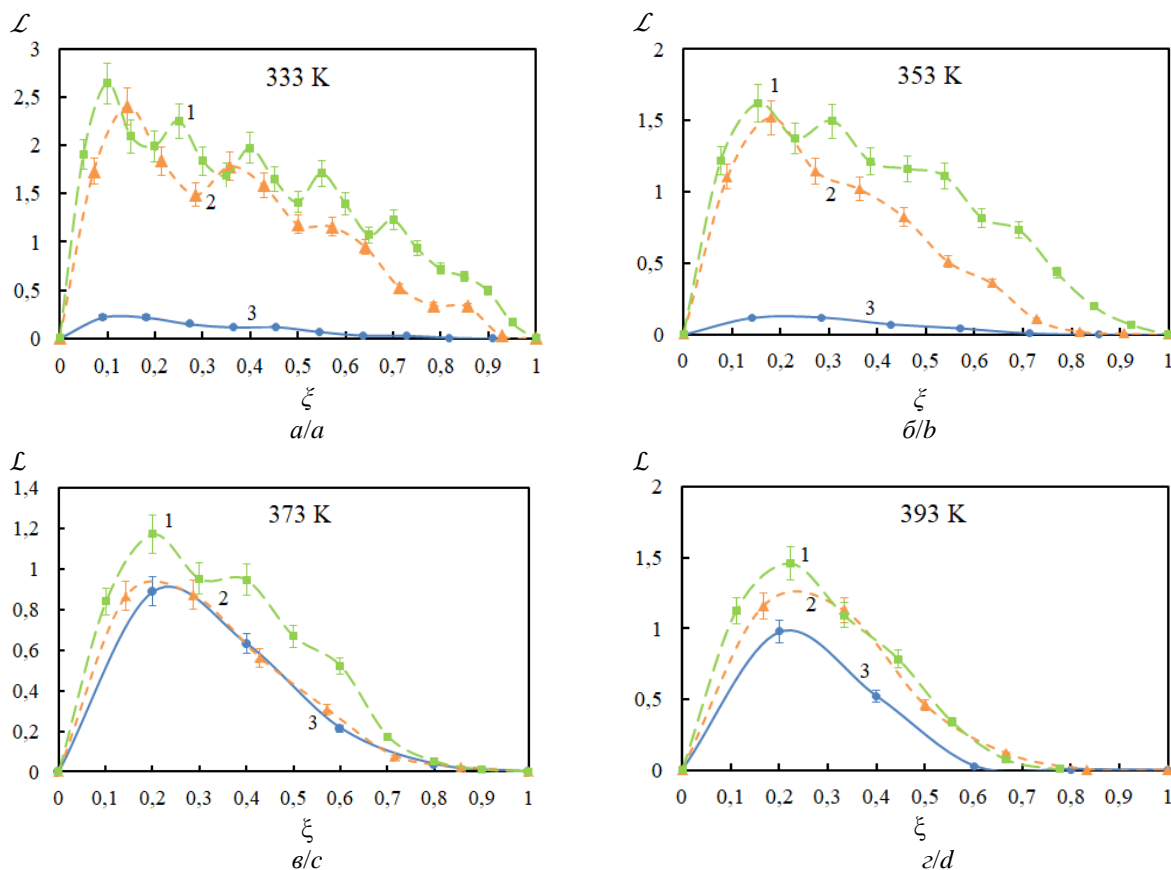
На рис. 3 представлены зависимости безразмерных массовых скоростей влагоудаления из слоя влажных сосновых опилок ( $\mathcal{L}=W_{eva}/W_0$ , где  $W_{eva}$  – скорость влагоудаления, зарегистрированная в экспериментах (рассчитана по формуле (2));  $W_0$  – скорость испарения воды со свободной поверхности при температуре поверхности фронта испарения  $T_{eva}=T_g$ , рассчитанная в соответствии с методикой [25] (значения  $W_0$  приведены в таблице)) от безразмерного времени сушки  $\xi=t/t_d$  (где  $t_d$  – полное время сушки (таблица)) при различных значениях плотности засыпки в диапазоне температур от 333 до 393 К.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3, показывает, что степень уплотнения биомассы оказывает существенное влияние на динамику влагоудаления. Увеличение плотности засыпки приводит к значительному росту скорости удаления влаги в идентичных (по температуре внутрикамерного пространства) условиях нагрева. Это, скорее всего, связано с тем, что увеличение  $\gamma$  приводит к уменьшению пористости структуры слоя биомассы. В результате теплопроводность биоматериала увеличивается. Последнее приводит к тому, что слой биомассы быстрее прогревается и, соответственно, процесс испарения воды интенсифицируется. Известно [26–30], что в процессе сушки фронт испарения воды движется от поверхности нагрева в глубинные слои древесины. В результате формируется высокопористый каркас с высоким термическим сопротивлением ( $R_{hr}=\lambda^{-1}$ ). Увеличение  $\gamma$  приводит к уменьшению  $R_{hr}$ . В результате слой биомассы прогревается более интенсивно по сравнению с навеской биомассы при  $\gamma=1$ .

**Таблица.** Значения скоростей влагоудаления ( $W_0$ ) и полного времени сушки ( $t_d$ ) при различных степенях уплотнения биомассы ( $\gamma$ )

**Table.** Values of rates of moisture removal ( $W_0$ ) and total drying time ( $t_d$ ) at different degrees of biomass compaction ( $\gamma$ )

		$\gamma=1$			
		$T_g=333$ К	$T_g=353$ К	$T_g=373$ К	$T_g=393$ К
$W_0$ , кг/м <sup>2</sup> ·с		$9,08 \cdot 10^{-5}$	$22,8 \cdot 10^{-5}$	$50,18 \cdot 10^{-5}$	$50,18 \cdot 10^{-5}$
$t_d$ , с		6600	4200	3000	3000
		$\gamma=1,5$			
$W_0$ , кг/м <sup>2</sup> ·с		$9,08 \cdot 10^{-5}$	$22,8 \cdot 10^{-5}$	$50,18 \cdot 10^{-5}$	$50,18 \cdot 10^{-5}$
$t_d$ , с		8400	5400	4200	3600
		$\gamma=2$			
$W_0$ , кг/м <sup>2</sup> ·с		$9,08 \cdot 10^{-5}$	$22,8 \cdot 10^{-5}$	$50,18 \cdot 10^{-5}$	$50,18 \cdot 10^{-5}$
$t_d$ , с		12000	7800	6000	5400



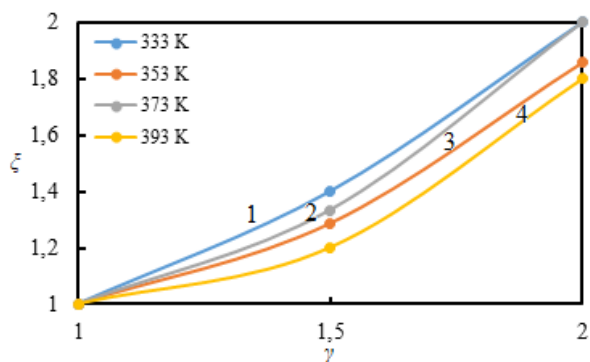
**Рис. 3.** Зависимости безразмерной скорости влагоудаления  $\mathcal{L}=W_{\text{evd}}/W_0$  от безразмерного времени сушки  $\xi=t/t_d$  при температуре в сушильной камере: а)  $T_g=333$  К; б)  $T_g=353$  К; в)  $T_g=373$  К; г)  $T_g=393$  К. Где 1 –  $\gamma=2$ ; 2 –  $\gamma=1,5$ ; 3 –  $\gamma=1$ . Вертикальные отрезки на рисунках иллюстрируют доверительные интервалы определения  $\mathcal{L}$

**Fig. 3.** Dependences of the dimensionless rate of moisture removal  $\mathcal{L}=W_{\text{evd}}/W_0$  on the dimensionless drying time  $\xi = t/t_d$  at the temperature in the drying chamber: а)  $T_g=333$  К; б)  $T_g=353$  К; в)  $T_g=373$  К; г)  $T_g=393$  К. Where 1 –  $\gamma=2$ ; 2 –  $\gamma=1,5$ ; 3 –  $\gamma=1$ . The vertical bars in the figures illustrate the confidence intervals for determination of  $\mathcal{L}$

Анализ  $\mathcal{L}(\xi)$  показывает, что в начальный период ( $\xi=0-0,2$ ) нагрева слоя влажной биомассы массовая скорость влагоудаления быстро повышается до максимальных значений, затем значения  $\mathcal{L}$  постепенно понижаются. При этом по результатам анализа рис. 3 можно отметить существенно нелинейный немонотонный характер зависимостей  $\mathcal{L}(\xi)$  в условиях низкотемпературного (в диапазоне изменения  $T_g=333-373$  К) нагрева. В то же время при относительно высоких температурах внешней среды ( $T_g=393$  К) значения  $\mathcal{L}$  монотонно возрастают до момента времени  $\xi=0,2$ , а затем монотонно убывают. Это, скорее всего, связано с тем, что с ростом температуры быстро повышается скорость испарения влаги. Этот фазовый переход сопровождается интенсивным поглощением теплоты в малой по размерам зоне, соответствующей окрестности границы раздела «влажная биомасса – сухая биомасса». Так как пористость материала навески велика (составляет около 75 %), водяной пар заполняет поры. Давление паров воды в малой окрестности зоны интенсивного испарения растёт. Но так как температура смеси «древесина–воздух–пары воды» в слое, прилегающем к открытой поверхности навески, выше, чем в её нижней части (нагреваемой менее интенсивно), часть водяных па-

ров фильтруются в более «холодную» часть навески. При охлаждении водяных паров происходит их конденсация на поверхностях элементов древесных опилок. В результате концентрация воды в нижней (более холодной) части навески повышается. Соответственно, после прогрева этой части навески растёт приток паров воды с единицы поверхности и интенсифицируется охлаждение биомассы.

На рис. 4 приведены зависимости безразмерного времени сушки  $\xi=t/t_d^0$  (где  $t$  – время сушки;  $t_d^0$  – время сушки при  $\gamma=1$ ) от степени уплотнения ( $\gamma$ ) навески биомассы при варьировании температуры внешней среды в диапазоне от 333 до 393 К. Анализ зависимостей рис. 4 показывает, что  $\gamma$  оказывает существенное влияние на характеристики и условия сушки. Так, увеличение  $\gamma$  в два раза приводит к практически двукратному замедлению процесса сушки. Последнее обусловлено тем, что уплотнение биомассы приводит к уменьшению пористости и, соответственно, проницаемости структуры слоя мелкодиспергированной древесины. В результате существенно возрастает сопротивление фильтрации. Последнее приводит к тому, что при  $\gamma=2$  водяным парам значительно труднее выйти на поверхность слоя биомассы, чем при степени уплотнения  $\gamma=1$ .



**Рис. 4.** Зависимости безразмерного времени сушки  $\zeta=t/t_d^0$  от степени уплотнения навески биомассы  $\gamma$  при температуре в сушильной камере: 1)  $T_g=333$  К; 2)  $T_g=353$  К; 3)  $T_g=373$  К; 4)  $T_g=393$  К

**Fig. 4.** Dependences of the dimensionless drying time  $\zeta=t/t_d^0$  on degree of biomass backfill compaction  $\gamma$  at the temperature in the drying chamber: 1)  $T_g=333$  K; 2)  $T_g=353$  K; 3)  $T_g=373$  K; 4)  $T_g=393$  K

Стоит отметить, что по результатам экспериментов установлена практически линейная зависимость  $\zeta(\gamma)$ . При этом температура внешней среды не оказывает значимого влияния на динамику сушки. В этих условиях можно обосновано предположить, что фильтрационные характеристики (плотность засыпки, проницаемость, пористость, размер пор) слоя древесной биомассы также оказывают значимое влияние, как и условия нагрева (температура внешней среды, интенсивность теплообмена, радиацион-

ные характеристики поверхностей нагрева сушильной камеры).

#### Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали, что степень уплотнения биомассы оказывает существенное влияние на характеристики и условия процесса сушки слоя влажной древесной биомассы во всем исследуемом диапазоне температур внешней среды ( $T_g=333$ – $393$  К). Показано, что увеличение плотности засыпки биомассы приводит к линейному росту времени полного влагоудаления.

Также показано, что в условиях относительно низких температур внешней среды ( $T_g=333$  К) массовая скорость влагоудаления в течение времени изменяется немонотонно. Установлено, что в начальный период нагрева  $W_{eva}$  быстро возрастает до максимального значения, а затем постепенно уменьшается. При этом зависимость  $W_{eva}(t)$  имеет, как правило, вейвлетовый (или волновой) характер. С увеличением температуры внешней среды ( $T_g=373$  К) характер зависимостей  $W_{eva}(t)$  меняется на монотонный. По результатам экспериментов разработана гипотеза, описывающая этот эффект. Показано, что определяющим динамику влагоудаления фактором (наряду с температурой внешней среды) является фильтрация водяных паров сквозь пористый древесный каркас.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10015).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Chitawo M.L., Chimphango A.F.A., Peterson S. Modelling sustainability of primary forest residues-based bioenergy system // Biomass and Bioenergy. – 2018. – V. 108. – P. 90–100.
- Improving the financial performance of solid forest fuel supply using a simple moisture and dry matter loss simulation and optimization / A. Laurén, A. Asikainen, Jyrki-Pekko Kinnunen, M. Palviainen, L. Sikanen // Biomass and Bioenergy. – 2018. – V. 116. – P. 72–79. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.05.014> (дата обращения 07.03.2021).
- Mitigating environmental pollution and impacts from fossil fuels: the role of alternative fuels / L. Liu, S.Y. Cheng, J.B. Li, Y.F. Huang // Energy Sources. P. A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2007. – V. 29. – P. 1069–1080.
- Hansen K., Mathiesen B.V., Skov I.R. Full energy system transition towards 100 % renewable energy in Germany in 2050 // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – V. 102. – P. 1–13.
- Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets / R. Garcia, M.V. Gil, F. Rubiera, C. Pevida // Fuel. – 2019. – V. 251. – P. 739–753.
- Dogan E., Inglesi-Lotz R. Analyzing the effects of real income and biomass energy consumption on carbon dioxide (CO2) emissions: empirical evidence from the panel of biomass-consuming countries // Energy. – 2017. – V. 138. – P. 721–727. DOI: 10.1016/j.energy.2017.07.136.
- Deng T., Alzahrani A.M., Bradley M.S. Influences of environmental humidity on physical properties and attrition of wood pellets // Fuel Processing Technology. – 2019. – V. 185. – P. 126–132.
- The influence of biomass energy consumption on CO2 emissions: a wavelet coherence approach / F. Bilgili, İ. Öztürk, E. Koçak, Ü. Bulut, Y. Pamuk, E. Muğaloğlu, H.H. Bağlıtaş // Environmental Science and Pollution Research International. – 2016. – V. 23. – P. 19043–19061. DOI: 10.1007/s11356-016-7094-2.

- Fogarasi S., Cormos C.-C. Technico-economic assessment of coal and sawdust co-firing power generation with CO2 capture // Journal of Cleaner Production. – 2015. – V. 103. – P. 140–148.
- Li P.W., Chyang Ch.S. A comprehensive study on NOx emission and fuel nitrogen conversion of solid biomass in bubbling fluidized beds under staged combustion // Journal of the Energy Institute. – 2020. – V. 93. – P. 324–334.
- Emissions of SO2, NOx, CO2, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels / E. Rokni, X. Ren, A. Panahi, Y.A. Levendis // Fuel. – 2018. – V. 211. – P. 363–374.
- Beagle E., Belmont E. Comparative life cycle assessment of biomass utilization for electricity generation in the European Union and the United States // Energy Policy. – 2019. – V. 128. – P. 267–275.
- Voytenko Y., Peck P. Organisational frameworks for straw-based energy systems in Sweden and Denmark // Biomass and Bioenergy. – 2012. – V. 38. – P. 34–48. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.049> (дата обращения 07.03.2021).
- Hao H., Chow C.L., Lau D. Effect of heat flux on combustion of different wood species // Fuel. – 2020. – V. 278. – P. 118325. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118325> (дата обращения 07.03.2021).
- Mirkowski Z., Jelonek I. Petrographic composition of coals and products of coal combustion from the selected combined heat and power plants (CHP) and heating plants in Upper Silesia, Poland // International Journal of Coal Geology. – 2019. – V. 201. – P. 102–108.
- A review on biomass as a fuel for boilers / R. Saidur, E.A. Abdelaziz, A. Demirbas, M.S. Hossain, S. Mekhilef // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – V. 15. – P. 2262–2289.
- Characterization of emissions from a pilot-scale combustor operating on coal blended with woody biomass / T.L.B. Yelverton, A.T. Brashear, D.G. Nash, J.E. Brown, C.F. Singer, P.H. Kariher, J.V. Ryan, P. Burnette // Fuel. – 2020. – V. 264. – P. 116774. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116774> (дата обращения 07.03.2021).

18. Liang J., Shan G., Sun Y. Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass: critical role of zeolite catalysts // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – V. 139. – P. 110707.
19. Mladenović M., Paprika M., Marinković A. Denitrification techniques for biomass combustion // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – V. 82. – P. 3350–3364.
20. Multi-scale complexities of solid acid catalysts in the catalytic fast pyrolysis of biomass for bio-oil production – a review / R. Liu, M. Sarker, Md.M. Rahman, Ch. Li, M. Chai, R. Cotillon, N.R. Scott // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2020. – V. 80. – P. 100852.
21. Features of the processes of heat and mass transfer when drying a large thickness layer of wood biomass / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.A. Nigay, V.I. Maksimov, N.Yu. Gutareva // *Renewable Energy*. – 2021. – V. 169. – P. 498–511. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.137> (дата обращения 07.03.2021).
22. Estimating the fuel moisture content to control the reciprocating grate furnace firing wet woody biomass / N. Striūgas, L. Vorotinskienė, R. Paulauskas, R. Navakas, A. Džiugys, L. Narbutas // *Energy Conversion and Management*. – 2017. – V. 149. – P. 937–949. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.014> (дата обращения 07.03.2021).
23. Schenck H. *Theories of engineering experimentation*. – London: McGraw-Hill, 1968. – 385 p.
24. Радкевич Я.М., Лактионов Б.И. *Метрология, стандартизация*. – М.: Высшая школа, 2004. – 767 с.
25. Хашенко А., Вечер О., Дискаева Е. Исследование температурной зависимости скорости испарения жидкостей со свободной поверхности и скорости кипения жидкости на твердой поверхности нагрева // *Известия Алтайского государственного университета*. – 2016. – Т. 1. – № 1. – С. 84–86.
26. Characteristics and conditions for ignition of bio-coal mixtures based on coal and forest combustible material / S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, N.Y. Gutareva, Zh.A. Kostoreva, A.A. Kostoreva, N.A. Nigay // *Journal of the Energy Institute*. – 2020. – V. 93. – P. 1978–1992. URL: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.04.013> (дата обращения 07.03.2021).
27. Theoretical justification of utilization of forest waste by incineration in a composition of bio-water-coal suspensions. Ignition stage / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, D.Yu. Malyshev, N.Yu. Gutareva, N.A. Nigay // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – V. 170. – P. 115034. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115034> (дата обращения 07.03.2021).
28. Estimation of energy consumption for drying of forest combustible materials during their preparation for incineration in the furnaces of steam and hot water boilers / N.A. Nigay, G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva // *Energy Sources. P. A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. – 2020. – V. 42. – P. 1997–2005. URL: <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1604910> (дата обращения 07.03.2021).
29. Mathematical and physical modeling of the coal–water fuel particle ignition with a liquid film on the surface / V. Salomatov, G. Kuznetsov, S. Syrodoy, N. Gutareva // *Energy Reports*. – 2020. – V. 6. – P. 628–643. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.02.006> (дата обращения 07.03.2021).
30. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y. Influence of a wet wood particle form on the characteristics of its ignition in the high-temperature medium // *Renewable Energy*. – 2020. – V. 145. – P. 1474–1486. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.046> (дата обращения 07.03.2021).

Поступила 11.03.2021 г.

#### Информация об авторах

**Нига́й Н.А.**, аспирант Инженерной школы энергетики НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Сыро́дой С.В.**, кандидат технических наук, научный сотрудник Инженерной школы энергетики НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

УДК 536.42

## INFLUENCE OF DENSITY OF WOOD BIOMASS FILLING ON THE CHARACTERISTICS OF ITS DRYING UNDER HIGH TEMPERATURE HEATING

**Natalya A. Nigay**<sup>1</sup>,  
nigay\_n.a@mail.ru

**Semen V. Syrodoy**<sup>1</sup>,  
ssyrodoy@yandex.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance.** The analysis of the forecasts of specialists shows that despite the active attempts of many states to introduce renewable energy sources into national energy systems by 2040, the bulk of the production of thermal and electric energy will still fall on thermal power plants that burn coal. For this reason, at present, active development of new technologies for fuel combustion is underway, which will completely (or at least significantly) reduce the use of coal at thermal power plants. One of the most promising areas is the combustion of woody biomass in the furnaces of boiler units. But the full-scale introduction of biomass as a fuel at thermal power plants is hampered by the lack of knowledge of heat and mass transfer that occur during wet wood drying. This is due to the fact that, as a rule, freshly harvested wood is significantly saturated with moisture. Combustion of such a highly watered biomass in combustion devices is ineffective. With a high initial humidity, a lot of heat will be spent on evaporation and, accordingly, the efficiency of the steam generation cycle may decrease. Therefore, the initial moisture-saturated raw material must be pre-dried. In this regard, one of the open problems of the energy sector at the present time is the lack of study of the main regularities of heat and mass transfer, occurring in a layer of finely dispersed moist woody biomass during its drying. The latter is necessary for development of the fundamental foundations for conducting experimental design work to substantiate the design characteristics of modern installations for biomass thermal preparation for combustion. In this case, as a rule, drying of large volumes of wood is carried out in large-sized equipment of the bunker type. In such bunkers, the height of the biomass layer can reach several tens of meters (up to 20 m). Obviously, under these conditions, wood density gradients (due to caking) will also be significant. It has been reliably established that the characteristics of moisture removal from a layer of moist woody biomass are influenced not only by the ambient temperature, but also by the filtration characteristics (density, pore size, permeability, porosity) of the dried material. But until now in the world scientific periodicals there are no publications describing the results of assessing the influence of moist finely dispersed wood filling density on the characteristics and conditions of its dehydration.

**The aim:** experimental studies of the influence of moist woody biomass layer backfill density on the integral characteristics of its drying.

**Object:** wet woody biomass (pine sawdust). Experimental studies were carried out at the following values of the degree of compaction of biomass  $\gamma$ : 1; 1.5; 2 (where  $\gamma = \rho/\rho_0$ ).

**Method:** experimental studies of moisture removal rate and the time of moist woody biomass dehydration at high-temperature heating ( $T_g = 333\text{--}393\text{ K}$ ) in the SNOL-3.5-M2U42 drying chamber.

**Results.** The paper introduces the results of experimental studies of moisture removal from a layer of moist woody biomass (based on typical woodworking waste – sawdust) under intense radiation-convective heating. The authors have analysed the influence of the wood layer bulk density ( $\rho$ ) on the dehumidification characteristics. It was found that the increase in the backfill ( $\rho$ ) density leads to a significant change in the dynamics of moisture removal (an increase in  $\gamma$  from 1 to 2 leads to a twofold increase in the drying time  $t_d$ ). It was shown that such increase in  $t_d$  is characteristic for all values of  $T_g$ . Also, according to the results of experiments, the characteristic values of the mass rate of moisture removal ( $W_{eva}$ ) were established depending on time at various degrees of compaction of the biomass layer. It is shown that under conditions of relatively low ambient temperatures, the function  $W_{eva}(t)$  changes non-monotonically, but has a wave character. A hypothesis is formulated describing such a dependence of the  $W_{eva}$  values on time. The results of the studies carried out significantly expand modern understanding of drying finely dispersed woody biomass under conditions of intense radiation-convective heating.

### Key words:

Woody biomass, woodworking waste, backfill density, drying, heat and mass transfer, moisture removal rate.

The research was carried out due to the grant of the Russian Science Foundation (project no. 18-79-10015).

### REFERENCES

- Chitawo M.L., Chimphango A.F.A., Peterson S. Modelling sustainability of primary forest residues-based bioenergy system. *Biomass and Bioenergy*, 2018, vol. 108, pp. 90–100.
- Laurén A., Asikainen A., Kinnunen J.P., Palviainen M., Sikanen L. Improving the financial performance of solid forest fuel supply using a simple moisture and dry matter loss simulation and optimization. *Biomass and Bioenergy*, 2018, vol. 116, pp. 72–79. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.05.014> (accessed 07 March 2021).
- Liu L., Cheng S.Y., Li J.B., Huang Y.F. Mitigating environmental pollution and impacts from fossil fuels: the role of alternative fuels. *Energy Sources. P. A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2007, vol. 29, pp. 1069–1080.
- Hansen K., Mathiesen B.V., Skov I.R. Full energy system transition towards 100 % renewable energy in Germany in 2050. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol. 102, pp. 1–13.
- García R., Gil M.V., Rubiera F., Pevida C. Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets. *Fuel*, 2019, vol. 251, pp. 739–753.
- Dogan E., Inglesi-Lotz R. Analyzing the effects of real income and biomass energy consumption on carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions: empirical evidence from the panel of biomass-consuming countries. *Energy*, 2017, vol. 138, pp. 721–727. DOI: 10.1016/j.energy.2017.07.136.
- Deng T., Alzahrani A.M., Bradley M.S. Influences of environmental humidity on physical properties and attrition of wood pellets. *Fuel Processing Technology*, 2019, vol. 185, pp. 126–132.

8. Bilgili F., Öztürk İ., Koçak E., Bulut Ü., Pamuk Y., Muğaloğlu E., Bağlıtaş H.H. The influence of biomass energy consumption on CO<sub>2</sub> emissions: a wavelet coherence approach. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2016, vol. 23, pp. 19043–19061. DOI: 10.1007/s11356-016-7094-2.
9. Fogarasi S., Cormos C.C. Technico-economic assessment of coal and sawdust co-firing power generation with CO<sub>2</sub> capture. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 103, pp. 140–148.
10. Li P.W., Chyang Ch.S. A comprehensive study on NO<sub>x</sub> emission and fuel nitrogen conversion of solid biomass in bubbling fluidized beds under staged combustion. *Journal of the Energy Institute*, 2020, vol. 93, pp. 324–334.
11. Rokni E., Ren X., Panahi A., Levendis Y.A. Emissions of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels. *Fuel*, 2018, vol. 211, pp. 363–374.
12. Beagle E., Belmont E. Comparative life cycle assessment of biomass utilization for electricity generation in the European Union and the United States. *Energy Policy*, 2019, vol. 128, pp. 267–275.
13. Voytenko Y., Peck P. Organisational frameworks for straw-based energy systems in Sweden and Denmark. *Biomass and Bioenergy*, 2012, vol. 38, pp. 34–48. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.049> (accessed 07 March 2021).
14. Hao H., Chow C.L., Lau D. Effect of heat flux on combustion of different wood species. *Fuel*, 2020, vol. 278, pp. 118325. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118325> (accessed 07 March 2021).
15. Mirkowski Z., Jelonek I. Petrographic composition of coals and products of coal combustion from the selected combined heat and power plants (CHP) and heating plants in Upper Silesia, Poland. *International Journal of Coal Geology*, 2019, vol. 201, pp. 102–108.
16. Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, pp. 2262–2289.
17. Yelverton T.L.B., Brashers A.T., Nash D.G., Brown J.E., Singer C.F., Kariher P.H., Ryan J.V., Burnette P. Characterization of emissions from a pilot-scale combustor operating on coal blended with woody biomass. *Fuel*, 2020, vol. 264, pp. 116774. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116774> (accessed 07 March 2021).
18. Liang J., Shan G., Sun Y. Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass: critical role of zeolite catalysts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 139, pp. 110707.
19. Mladenović M., Paprika M., Marinković A. Denitrification techniques for biomass combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 82, pp. 3350–3364.
20. Liu R., Sarker M., Rahman M.M., Li Ch., Chai M., Cotillon R., Scott N.R. Multi-scale complexities of solid acid catalysts in the catalytic fast pyrolysis of biomass for bio-oil production – a review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2020, vol. 80, pp. 100852.
21. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Nigay N.A., Maksimov V.I., Gutareva N.Yu. Features of the processes of heat and mass transfer when drying a large thickness layer of wood biomass. *Renewable Energy*, 2021, vol. 169, pp. 498–511. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.137> (accessed 07 March 2021).
22. Striugas N., Vorotinskienė L., Paulauskas R., Navakas R., Džiugys A., Narbutas L. Estimating the fuel moisture content to control the reciprocating grate furnace firing wet woody biomass. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 149, pp. 937–949. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.014> (accessed 07 March 2021).
23. Schenck H. *Theories of engineering experimentation*. London, McGraw-Hill, 1968. 385 p.
24. Radkevich Y.M., Laktionov B.I. *Metrologiya, standartizatsiya* [Metrology, standardization]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2004. 767 p.
25. Khashchenko A., Vecher O., Diskaeva E. Study of the temperature dependence of the rate of evaporation of liquids from a free surface and the rate of boiling of a liquid on a solid heating surface. *Bulletin of the Altai State University*, 2016, vol. 1, pp. 84–86.
26. Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Gutareva N.Y., Kostoreva Zh.A., Kostoreva A.A., Nigay N.A. Characteristics and conditions for ignition of bio-coal mixtures based on coal and forest combustible material. *Journal of the Energy Institute*, 2020, vol. 93, pp. 1978–1992. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.04.013> (accessed 07 March 2021).
27. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Malyshev D.Yu., Gutareva N.Yu., Nigay N.A. Theoretical justification of utilization of forest waste by incineration in a composition of bio-water-coal suspensions. Ignition stage. *Applied Thermal Engineering*, 2020, vol. 170, pp. 115034. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115034> (accessed 07 March 2021).
28. Nigay N.A., Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y. Estimation of energy consumption for drying of forest combustible materials during their preparation for incineration in the furnaces of steam and hot water boilers. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2020, vol. 42, pp. 1997–2005. Available at: <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1604910> (accessed 07 March 2021).
29. Salomatov V., Kuznetsov G., Syrodoy S., Gutareva N. Mathematical and physical modeling of the coal–water fuel particle ignition with a liquid film on the surface. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, pp. 628–643. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.02.006> (accessed 07 March 2021).
30. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y. Influence of a wet wood particle form on the characteristics of its ignition in the high-temperature medium. *Renewable Energy*, 2020, vol. 145, pp. 1474–1486. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.046> (accessed 07 March 2021).

Received: 11 March 2021.

#### Information about the authors

**Natalya A. Nigay**, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.  
**Semen V. Syrodoy**, Cand. Sc, researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.